

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 82 страниц, 25 рисунков, 10 таблиц, 45 формул, 21 источник.

Ключевые слова: объект управления с запаздыванием, регулятор, автоматическое регулирование, транспортное запаздывание, предиктор Смита.

Объектом исследования является САУ с запаздыванием.

Цель работы - изучить варианты построения систем управления объектами с запаздыванием, дать рекомендации по настройке регуляторов для таких систем.

В результате исследования рассмотрены основные виды запаздываний и несколько вариантов решений их устранения, исследованы методы управления запаздываниями, на основании исследований сделаны выводы.

Достигнуто стабильное качество управления систем с запаздыванием. Исследования могут применяться для дальнейшего выполнения научных работ, как в теоретических, так и в практических целях.

Экономическая эффективность/значимость работы заключается в простоте искоренения запаздывания, малых затратах на исследования, а так же возможности внедрения на производстве.

В будущем планируется более подробное рассмотрение САУ с запаздыванием, определение решений для искоренения запаздываний и возможное применение на технологических объектах.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

САУ – система автоматического управления

ОУ – объект управления

ПК – персональный компьютер

ТОУ – технический объект управления

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня представить себе промышленное производство, самолеты, корабли, в том числе космические, автомобили, бытовую технику и многие другие технические средства без автоматического управления невозможно. Поэтому обсуждать актуальность создания автоматизированных систем нет смысла.

Большую часть автоматизированных объектов действующих САУ составляют объекты с наличием некоторого чистого запаздывания. Практически все объекты могут быть описаны дифференциальным уравнением высокого порядка, поэтому наиболее распространена их аппроксимация уравнениями 1-го и 2-го порядка с запаздыванием, что фактически переводит математическое описание ТОУ к дифференциальным уравнениям бесконечного порядка.

Автоматическое управление ТОУ с запаздыванием имеет определенные сложности, связанные с необходимостью предсказания реакции объекта после действия управляющих и возмущающих воздействий. На протяжении многих лет развития систем управления специалисты искали пути улучшения качества управления объектами с запаздыванием, поэтому существует много методов и методик структурного и параметрического синтеза систем такими объектами.

В первую очередь это, конечно, инженерные методики параметрического синтеза стандартных (ПИД) законов управления, которые до сих пор составляют основу большей части алгоритмов промышленных систем автоматизированного управления. [1]

Следующим этапом развития стала разработка различных предикторов – регуляторов с компенсацией запаздывания (предиктор Смита, регуляторы Далина, Калмана, Острема и др. [2]). Появление и бурное развитие управляющей вычислительной техники, привело к появлению цифровых

методик синтеза алгоритмов управления объектами с запаздыванием. Это регулятор Цыпкина [4], апериодические регуляторы и регуляторы с конечным временем установления [12].

В настоящее время для объектов с запаздыванием часто применяют новые методы, основанные на нечеткой логике и нейронных сетях [12].

Целью настоящей работы является анализ особенностей моделирования и синтеза САУ объектами управления с чистым запаздыванием.

В этом случае объектом исследования является САУ объектом управления с чистым запаздыванием.

Предметом исследования являются методы моделирования чистого запаздывания в САУ и методики синтеза САУ объектами управления с чистым запаздыванием.

Задачами работы является анализ методов моделирования чистого запаздывания в САУ на примере моделирования с помощью не минимально-фазового звена первого порядка и анализ методик синтеза систем управления объектами с запаздыванием на примере САУ с регулятором Смита. Анализ заключался в исследовании указанных метода и методики с помощью вычислительных экспериментов в среде Mathlab Simulinc и сравнение результатов с другими известными методами и методиками, описанными в литературных источниках.

1. ТОУ С ЧИСТЫМ ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

Промышленные объекты управления обычно состоят из нескольких элементов обладающих собственными динамическими характеристиками. На рис.1.1 приведена структурная схема типового промышленного объекта управления состоящего из исполнительного устройства (ИУ), регулирующего органа (РО), технологического процесса (ТП), датчика (Д) и нормирующего преобразователя (НП)

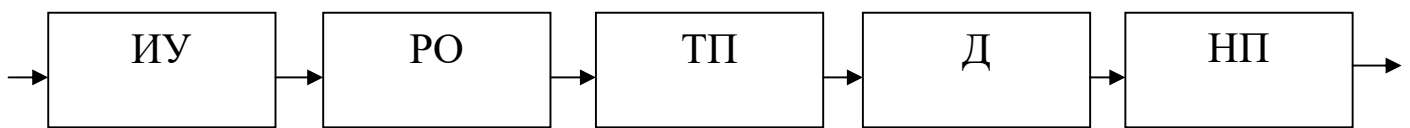


Рис. 1.1 - Структурная схема обобщенного ТОУ

В общем виде такой объект должен описываться дифференциальным уравнением высокого порядка, учитывающим динамику каждого элемента ТОУ. Обычно, для решения задач синтеза систем автоматического управления ограничиваются описанием дифференциальным уравнением первого или второго порядка с запаздыванием. Аппроксимация уравнениями 1-го и 2-го порядка с запаздыванием фактически переводит математическое описание ТОУ к бесконечному порядку.

2 ПРИМЕРЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

Большую часть промышленных объектов составляют объекты с запаздыванием. Примеров объектов с транспортным запаздыванием великое множество. Это вращающиеся печи, которые применяют во многих отраслях промышленности (особенно в цементной и металлургической), ленточные транспортеры, нагреватели и многие другие аппараты и механизмы с пространственным распределением зоны технологического процесса. Рассмотрим особенности технологических объектов управления на примере вращающихся печей и ленточных транспортеров.

2.1 Вращающиеся печи

Вращающаяся печь – это технологический агрегат в виде цилиндра непрерывного действия, в котором из-за наклона печи и вращения, происходит процесс перемещения материала, при этом сжигается топливо и выделяется тепло. Печи отличаются между собой габаритами и дизайном. Печи бывают для обжига цинка, цемента, ртутисодержащих веществ, для спекания бокситов, кальцинации глиноземов, а так же для сушки металлургических промежуточных материалов.

Вращающиеся печи относятся к печам теплообменникам. Температура в таких печах иногда достигает до 1650°C . При движении по длине печи продуктов сгорания топлива, они охлаждаются и режим работы печи становится конвективным. В зависимости от вида и параметров технологического процесса в печи идет распределение зон с конвективным и радиационным режимом работы.

Кроме печей для сушки сульфидного сырья, все остальные печи работают в режиме противотока. Поступающие в печь материалы могут иметь влажность, вплоть до пульпы, содержащей до 40 % воды. Шихта (материал) подается в хвостовую (верхнюю) часть печи и постепенно движется навстречу газам, которые появляются в процессе сгорания топлива

в головной части печи. Далее из барабана переработанные материалы поступают в холодильник, а газы и газообразные продукты отправляются в специальную систему пылегазоочистки. Для отопления таких печей могут быть использованы такие материалы как твердое топливо и мазут, природный газ и т.д.

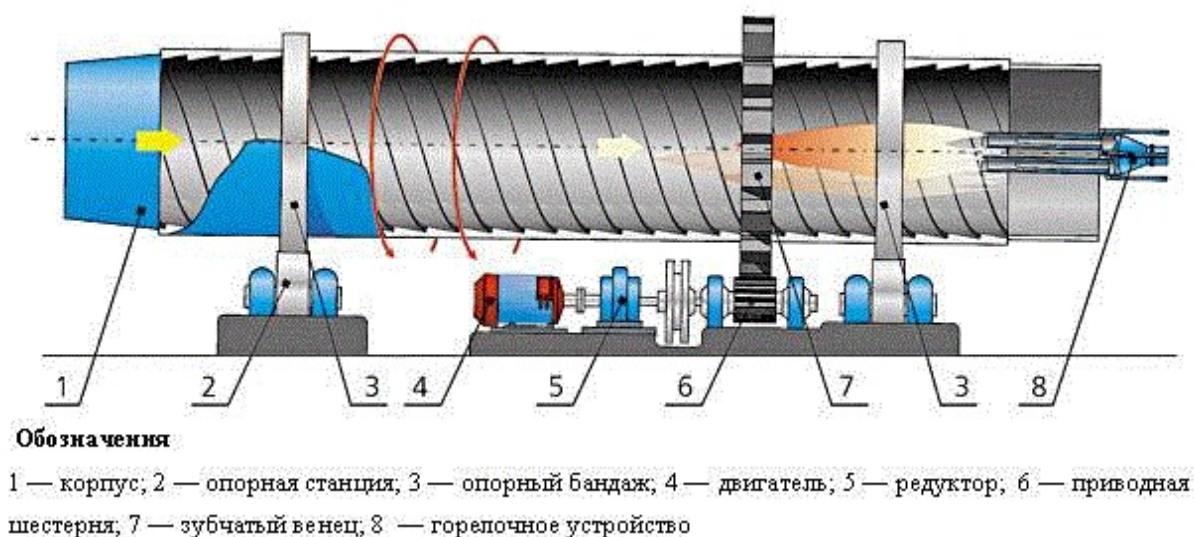


Рис. 2.1 – Вращающаяся печь

Внутри печь обложена кирпичом, снаружи имеет металлическую конструкцию представляющую собой трубу, длина которой достигает до 185 м., а диаметр до 5 м.. Труба крепится на специальные ролики, корпус имеет наклон примерно 3° , для перемещения материалов в конструкции. Частота вращения привода у такого агрегата составляет 1 об/мин.

Всю нагрузку на себя от веса барабана берут на себя опорные бандажи, которые имеют кольцевидную форму. Чем больше печь по размеру, тем сложнее конструкция опорных бандажей.

С одной стороны печи находится загрузочная камера, в которую подготовленный материал подается с помощью специальной форсунки или ковшом дозатором.

С другой стороны печи находится разгрузочная камера. Между барабаном и разгрузочной камерой устанавливаются специальные уплотнения. Так же в этой трубе имеются отверстия для установки

горелочных устройств и приспособление по которому готовый материал поступает в холодильник.

Так же устанавливают цепные завесы, для того чтобы не было налипания в барабане влажной шихты, или используют отбойное устройство, представляющее собой связки рельсов на цепях.

2.2 Производство цемента «мокрый» способ

Производства цемента по мокрому способу происходит во вращающейся печи по принципу противотока – газовый поток и сырьевая смесь движутся навстречу друг другу. С одной стороны движется материал, а с другой стороны горячие газы.

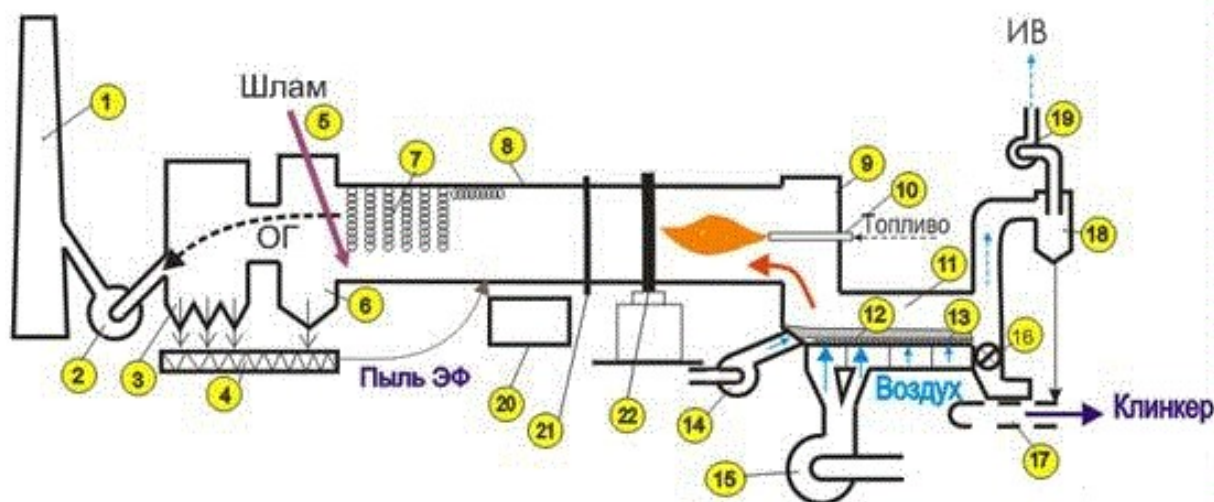


Рис 2.2 - Вращающаяся печь мокрого способа

1 - дымовая труба; 2 - дымосос; 3 - электрофильтр; 4 - система пылевозврата; 5 - шламовая труба; 6 - пылеулавливающая камера; 7 - цепная завеса; 8 - вращающаяся печь; 9 - головка печи; 10 - топливная форсунка; 11 - колосниковый холодильник; 12 - решетка горячей камеры; 13 - решетка холодной камеры; 14 - вентилятор острого дутья; 15 - вентилятор общего дутья; 16 - клинкерная дробилка; 17 - клинкерный транспортер; 18 - осадительный циклон; 19 - вентилятор избыточного воздуха.

Шлам, приготовленный заранее с помощью насосов подается в питатель для дозирования и питания печи (6). Далее по сливной трубе (5) перемещается в загрузочную часть печи. В электрофильтре (3) происходят процессы фильтрации на мелкие и крупные частицы. Мелкие частицы сразу

отправляются на окончательную очистку, а крупные осаждаются. Иногда для более эффективной очистки устанавливают дополнительное оборудование – батарейные центробежные циклоны. Примерное время процесса обжига составляет два часа.

Для того чтобы отработанные газы выбрасывались через дымовую трубу(1) в атмосферу устанавливается мощный дымосос (2). Скопившиеся пыль в электрофилтре по трубе насосами подается в печь за цепную завесу.

Охлаждение готовой продукции происходит в специальном холодильнике с холодным потоком воздуха. Разница между обеспечиваемым и нужным количеством воздуха в холодильнике, выбрасывается в атмосферу после очистки в специальном оборудовании.

2.3. Процесс обжига цинковых концентратов в кипящем слое

В основном печи для обжига цинковых концентратов в кипящем слое имеют цилиндрическую форму конструкции.

Рис. 2.3 - Цилиндрическая печь кипящего слоя:

1 - подина; 2 — форсунка для розжига печи; 3 - форкамера для загрузки концентрата; 4 — корпус печи; 5 — отверстие для отвода газов; 6 — сливной порог; 7 — трубчатые кессоны испарительного охлаждения; 8 - воздушная коробка; 9 - задвижка с пневмоприводом; 10 - футеровка; 11 — свод

В состав печи входят шахта реакционная, камера для загрузки и выгрузки материалов, подина, устройство для подачи дутья, устройство для фильтрации и отводов газов.

Шахта обтянута железом и футерована шамотом, между ними проложена теплоизоляция в виде асбестового листа или стекловаты.

Подина имеет вид металлического листа с отверстиями для воздухораспределительного оборудования — сопла.

Воздушная коробка может быть как общей, так и разделена на несколько отсеков. Через коробку подводится дутье.

Для загрузки материала чаще всего используется ленточный питатель, который позволяет точно и равномерно производить дозировку материала.

Разгрузка готовой продукции осуществляется через специальное разгрузочное окно. После заполнения емкости материалом производится выгрузка с помощью шлюзового питателя. Через отверстия газохода происходит выброс газов.

При загрузке концентрата в печь используется форсунка или переносная горелка.

Обжиг цинковых концентратов вводится в одну стадию.

При производстве цинка на предприятиях смесь концентратов, разных по составу, перерабатывают. Затем концентраты смешивают в необходимых пропорциях для получения нужной по составу шихты (смеси).

В горячую печь обычно подают сухую шихту, но бывает и в виде пульпы. Шихту в виде пульпы намного сложнее распределить по горячему слою, и она увлажняет отходящие газы, но зато в таком состоянии гораздо лучше перемешиваются разные по составу концентраты.

При процессе получения сухой шихты компоненты смешиваются до однородности, затем, если требуется, подсушиваются в специальном устройстве до определенной влажности и происходит процесс сортировки.

2.4 Регулирование количества угля на ленточных транспортерах

Задача системы является непрерывная подача угля в мельницу. Начинается процесс с подачи угля в бункер. Далее с помощью ленточного транспортера уголь подается на весы, после взвешивания он ссыпается в мельницу. Вес угля контролируется грузом, подвешенным на плече весов. Если есть несоответствие между массой угля заданной и действительной, то выдается ошибка.

Количество угля, которое поступает из бункера на ленточный транспортер, измеряется не сразу, а спустя некоторое время, время запаздывания, которое зависит от скорости транспортировки угля.

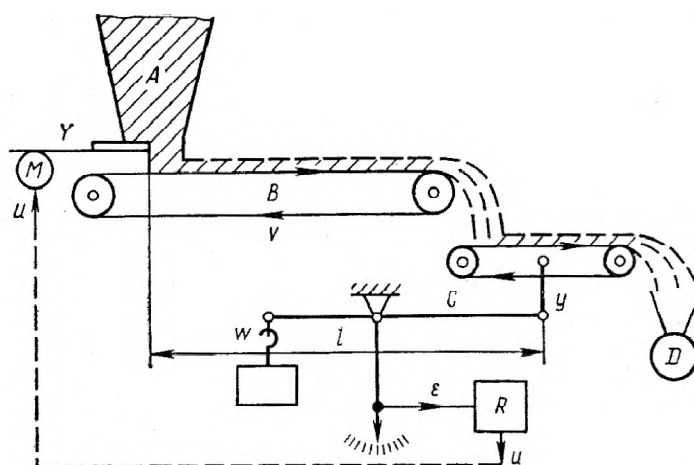


Рис. 2.4 – Ленточный транспортер для подачи угля

Интервал времени можно определить выражением $\tau = \frac{l}{v}$;

Сигнал u проходит без изменений с запаздыванием.

3 ОБЗОР МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

Автоматическое управление ТОУ с запаздыванием имеет определенные сложности, связанные с необходимостью предсказания реакции объекта после действия управляющих и возмущающих воздействий. На протяжении многих лет развития систем управления специалисты искали пути улучшения качества управления объектами с запаздыванием, поэтому существует много методов и методик структурного и параметрического синтеза систем такими объектами.

В первую очередь это, конечно, инженерные методики параметрического синтеза стандартных (ПИД) законов управления, которые до сих пор составляют основу большей части алгоритмов промышленных систем автоматизированного управления. [Первозванский]

Следующим этапом развития стала разработка различных регуляторов с компенсацией запаздывания (предиктор Смита, регуляторы Рейсвика, Далина, Калмана, Острема и др. [2]). Появление и бурное развитие управляющей вычислительной техники, привело к появлению цифровых методик синтеза алгоритмов управления объектами с запаздыванием. Это регулятор Цыпкина [4], апериодические регуляторы и регуляторы с конечным временем установления [12].

3.1 Метод параметрически оптимизируемых регуляторов

На рис. 6 изображена блок-схема типовой схемы одноконтурной системы управления с одной регулируемой переменной y , в которой предполагается также наличие одной управляющей переменной u , вектора состояний $x(k)$, возмущающего воздействия $v(k)$.

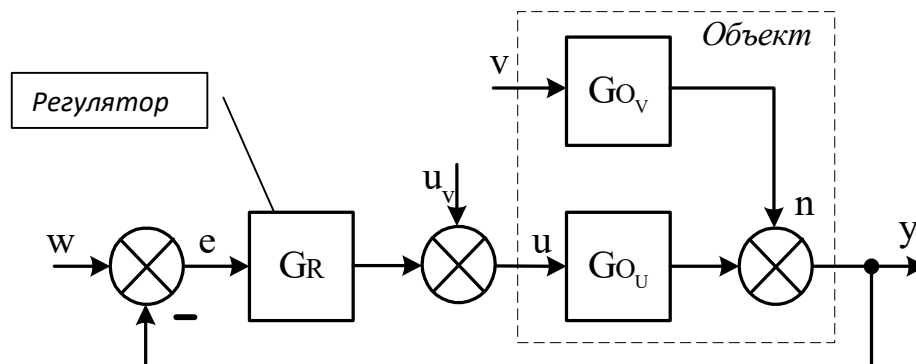


Рис. 3.1 - Блок-схема типовой схемы одноконтурной системы управления

В системах автоматического управления регулируемая переменная y должна как можно более точно компенсировать изменения не только задающего сигнала w , но и различного рода возмущения (например, v). Т.е. управление u должно изменяться так, чтобы ошибка управления $e = w - y$ была как можно меньше ($e \approx 0$). Если задающая переменная изменяется во времени, то необходимо проектировать следящую систему управления. Если задающая переменная длительное время остается постоянной, то такая система называется системой стабилизации [10]. Кроме того, задачей управления является обеспечение устойчивости всей системы при неустойчивом процессе [10].

Для управления объектами с запаздыванием наиболее часто применяются стандартные регуляторы, структура которых предварительно задана на основе некоторой априорной информации о характеристиках ТОУ,

а параметры регуляторов определяются с помощью различных методов оптимизации или инженерных методик.

Наиболее распространенным стандартным регулятором является пропорционально – интегрально – дифференциальный (ПИД) регулятор. Его передаточную функцию в классическом виде может быть представлена:

$$G_R(s) = K_R \left(1 + sT_d + \frac{1}{sT_i} \right) \quad (3.1.1)$$

Где: T_d - время упреждения регулятора;

T_i - время изотропа регулятора;

K_R - коэффициент усиления регулятора.

Рассмотрим наиболее распространенные методы параметрического синтеза ПИД регуляторов.

3.2. Эмпирические методы

Эти наиболее распространенные методы основаны на экспериментальных исследованиях ТОО.

Метод Зиглера – Никольса применим для устойчивых объектов и проводится по следующей методике [Гудвин]:

На реальном объекте с П регулятором проводится эксперимент по определению критического коэффициента усиления регулятора при котором на выходе регулятора возникают устойчивые незатухающие колебания. Определяются значение критического коэффициента усиления регулятора K_k и период колебаний на выходе регулятора T_k . По этим значениям рассчитывают параметры ПИД регулятора:

$$K_R = 0,6K_k; \quad T_i = 0,5T_k; \quad T_d = T_k/8;$$

Такие параметры обычно приводят к существенному перерегулированию в системе управления и требуют дополнительной настройки.

Не всегда имеется возможность провести подобный эксперимент на реальном промышленном объекте. Поэтому Зиглером и Никольсом была разработана методика, позволяющая определить параметры ПИД закона по модели ТОО:

$$K_R = (1,2T_0)/(K_0 \tau_0); \quad T_i = 2 \tau_0; \quad T_d = 0,5\tau_0;$$

Для базового ТОО параметры ПИД регулятора можно рассчитать:

$$K_R = (1,2*40)/(1*60) = 0,8; \quad T_i = 2*60 = 120 \text{ с}; \quad T_d = 0,5*60 = 30 \text{ с}.$$

3.3. Метод оптимального модуля

Метод оптимального модуля используется в том случае, когда требуется, чтобы система максимально точно воспроизводила управляющий сигнал. Так же этот метод можно использовать в системах, модернизировав его, где требуется быстрая ликвидация отклонений под действием возмущений.[Гурецкий]

В САУ, где применяется метод оптимального модуля, переходные процессы имеют малое перерегулирование и время протекания.

Критерий оптимального модуля обеспечивает выбор параметров регулятора на основании следующих требований:

- 1) полоса пропускания системы для полезного сигнала по возможности должна быть широкой;
- 2) амплитудная характеристика не должна иметь резонансного пика, а быть по возможности монотонной, убывающей. Следовательно, вид

амплитудно-частотной характеристики должен быть таким, как показано на рис. 3.1.

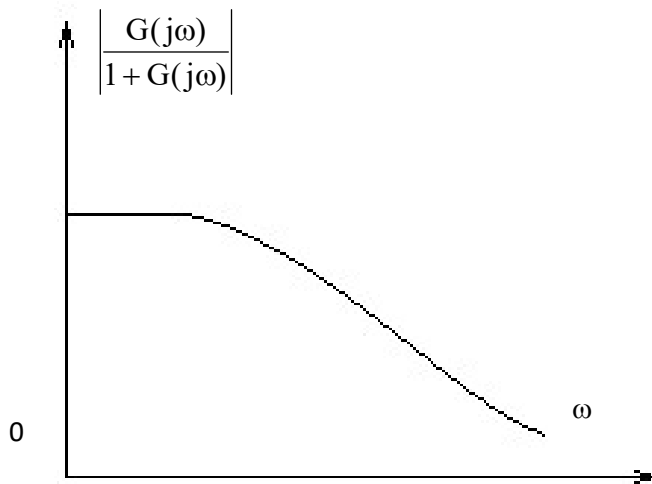


Рис. 3.1

Вид желаемой АЧХ
замкнутой системы.

$$\frac{d^k}{d\omega^k} \left[\left| \frac{G(j\omega)}{1 + G(j\omega)} \right| \right]_{\omega=0} = 0, \quad k = 1, 2, \dots, 2\ell. \quad (3.1.1)$$

$$G(j\omega) = G_R(j\omega) G_0(j\omega),$$

где: ℓ – число настраиваемых параметров регулятора.

Переходные процессы систем автоматического регулирования, спроектированных с использованием критерия оптимального модуля, отличаются малым временем протекания и малым перерегулированием .

Идеальной системой регулирования следует считать систему, которая обладает абсолютными фильтрующими свойствами, то есть систему, АЧХ которой относительно возмущающего воздействия равна нулю во всем диапазоне частот, а АЧХ относительно управляющего воздействия равна единице .

$$\begin{cases} |G_u(j\omega)| = 1 \\ |G_f(j\omega)| = 0 \end{cases} \quad (3.1.2)$$

Однако, на практике, такую систему реализовать невозможно. Наивысшая интенсивность спектра возмущений лежит в области низших частот, т.е. в области $\omega=0$. Таким образом, требование (3.1.2) с использованием разложения в ряд Тейлора в окрестности $\omega=0$ можно записать в виде:

$$\begin{cases} |G_f(j\omega)|_{\omega=0} = 0; \\ \frac{d}{d\omega}|G_f(j\omega)|_{\omega=0} = 0; \\ \dots\dots\dots \\ \frac{d^k}{d\omega^k}|G_f(j\omega)|_{\omega=0} = 0; \end{cases} \quad (3.1.2)$$

$$\begin{cases} |G_u(j\omega)|_{\omega=0} = 1; \\ \frac{d}{d\omega}|G_u(j\omega)|_{\omega=0} = 0; \\ \dots\dots\dots \\ \frac{d^k}{d\omega^k}|G_u(j\omega)|_{\omega=0} = 0; \end{cases} \quad (3.1.3)$$

Применение условий (3.1.2), (3.1.3) затруднительно. Возможно использование только условий (3.1.3). Получим такие условия для систем с запаздыванием.

Пусть, передаточная функция замкнутой системы по управляющему воздействию представляется в виде:

$$G_z(j\omega) = \frac{L(j\omega)}{M(j\omega)}. \quad (3.1.4)$$

Дифференцируя зависимость

$$|L(j\omega)|^2 = L(j\omega)L(-j\omega) \quad (3.1.5)$$

и используя формулу Лейбница, получим

$$\frac{d^m}{d\omega^m} [L(j\omega)]^2 = \sum_{k=0}^m C_k^m L^{(m-k)}(j\omega) L^{(k)}(-j\omega) \quad (3.1.6)$$

Аналогично можно сделать и для $|M(j\omega)|^2$. Разложив в степенной ряд $L(j\omega)$ и $L(-j\omega)$, можно убедиться, что

$$\frac{d^m}{d\omega^m} [L(j\omega)] = (-1)^m \frac{d^m}{d\omega^m} [L(-j\omega)] \quad (3.1.7)$$

Из соотношений (3.1.6), (3.1.7) получим

$$\frac{d^m}{d\omega^m} [L(j\omega)]^2 = \sum_{k=0}^m (-1)^k C_k^m L^{(m-k)}(j\omega) L^{(k)}(-j\omega) \quad (3.1.8)$$

Аналогично можно записать для $M(j\omega)$.

Условия (1), в силу выражения (3.1.3) и (3.1.7) принимают следующий вид:

$$\left[\frac{\sum_{k=0}^m (-1)^k C_k^m L^{(m-k)}(j\omega) L^{(k)}(j\omega)}{\sum_{k=0}^m (-1)^k C_k^m M^{(m-k)}(j\omega) M^{(k)}(j\omega)} \right]_{\omega=0} = \left[\frac{|L(j\omega)|^2}{|M(j\omega)|^2} \right]_{\omega=0} = 1 \quad (3.1.9)$$

Теперь на основании соотношения (3.1.9), можно найти оптимальные настройки регуляторов для систем с конкретным типом объекта.

В нашем случае объект представлен передаточной функцией вида:

$$G_0(s) = \frac{K_0 e^{-\tau}}{(T_0 s + 1)} \quad (3.1.10)$$

где K_R – коэффициент передачи исходного аналогового ПИД-регулятора;

T_H – время изодрома;

T_d – время предварения;

$T_{Ц}$ – цикл управления.

Оптимальные значения параметров K_R , T_H , T_d , рассчитываются по формулам :

$$K_R = K / K_o^U ; \quad (3.1.11)$$

$$T_H = I \cdot \tau ; \quad (3.1.12)$$

$$T_d = D \cdot \tau ; \quad (3.1.13)$$

при этом:

$$K = \frac{I}{\frac{2}{I}(T + I) - 2} ; \quad (3.1.14)$$

$$\frac{I}{I} = \frac{15(2T + I)(6T^2 + 3T + I)}{180T^4 + 240T^3 + 135T^2 + 42T + 7} ; \quad (3.1.15)$$

$$D = \frac{60T^4 + 60T^3 + 27T^2 + 7T + I}{180T^4 + 240T^3 + 135T^2 + 42T + 7} ; \quad (3.1.16)$$

$$T = \frac{T_o}{\tau} ; \quad (3.1.17)$$

где τ_o – время запаздывания объекта;

T_o – постоянная времени объекта;

K_o – коэффициент передачи объекта по каналу управления;

Расчет параметров ПИД регулятора для базового объекта дает значения:

$K_R = 0,78$; $T_i = 61$ с; $T_d = 14$ с.

3.2 Регуляторы на основе предикторов

Временные запаздывания в промышленных процессах приводят к тому, что информация о ходе процесса поступает к регулятору позже, чем это требуется, что может привести к неустойчивости замкнутой системы. Сложность управления объектами с временными задержками характеризуется отношением величины запаздывания к постоянной времени

объекта: чем оно больше – тем труднее добиться требуемого качества регулирования.

Повысить качество управления такими объектами можно двумя способами:

- уменьшением запаздывания в объекте путем внесения конструктивных изменений
- применением более сложной структуры системы управления, позволяющей уменьшить негативное влияние запаздывания.

Одной из структур, предназначенных для управления объектами с запаздыванием, является предиктор Смита. Его рекомендуют применять при соотношении величины запаздывания к постоянной времени объекта, описываемом следующим соотношением [1]:

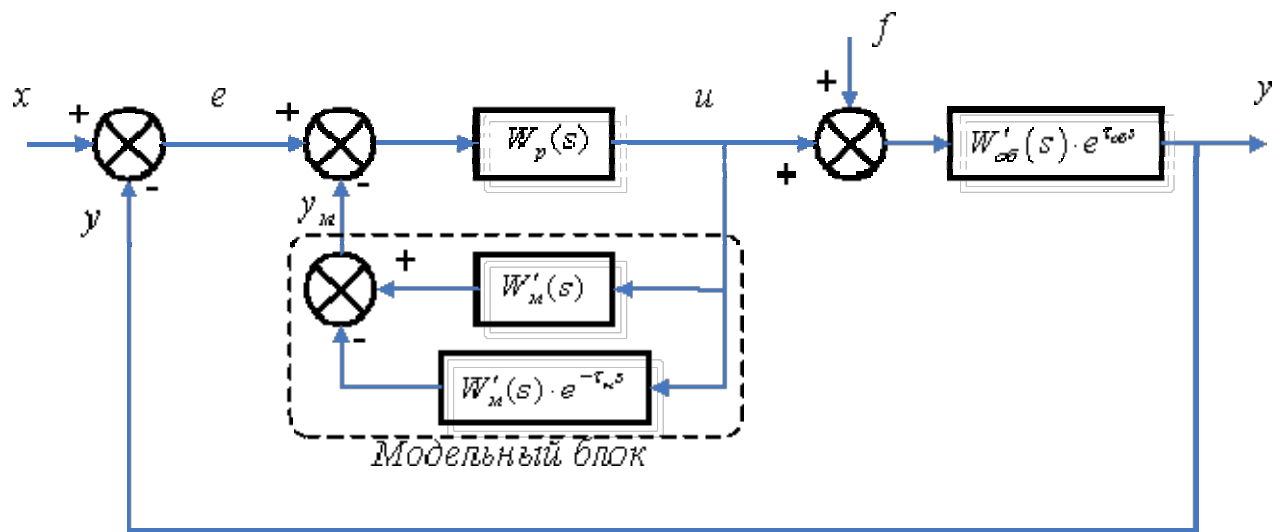
$$\frac{\tau}{(\tau + T)} > (0,2 \dots 0,5), \quad (3.2.1)$$

где: τ - время запаздывания, T - постоянная времени объекта.

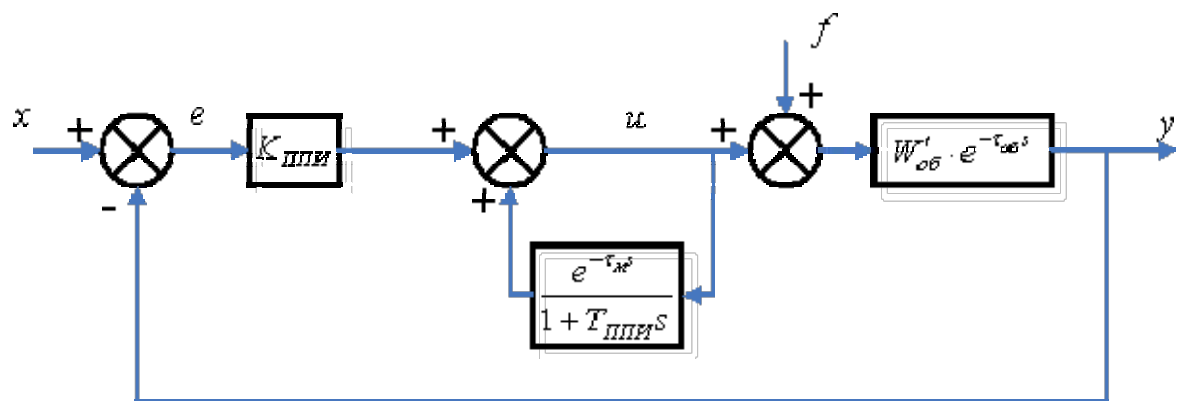
Структурная схема замкнутой системы автоматического регулирования (САР) с предиктором Смита приведена на рис. 3.2.1, а [2]. Она содержит дополнительный внутренний контур обратной связи с модельным блоком, в котором содержится модель объекта с запаздыванием, а также модель объекта без запаздывания. Дополнительный контур обратной связи формирует сигнал, идентичный такому, который со временем появится на выходе системы, и подает его на вход регулятора до тех пор, пока не

появится сигнал от главной цепи обратной связи. По мере его возрастания сигнал с выхода модельного блока уменьшается.

Также для управления объектами с запаздываниями применяется ППИ (предиктивный пропорционально-интегрирующий) регулятор, который является модификацией предиктора Смита [3]. Его структурная схема изображена на рис. 3.2.



а)



б)

Рис. 3.2 Структурные схемы САР: а) с предиктором Смита; б) с ППИ – регулятором

На рисунке 3.2 приняты следующие обозначения:

x - заданное значение регулируемой величины;

f - возмущение;

y - текущее значение регулируемой величины;

e - сигнал рассогласования;

u - управляющий сигнал;

y_i - сигнал с выхода модельного блока;

$W_{i\delta}^*(s) \cdot e^{-\tau_{i\delta}s}$ - передаточная функция объекта регулирования;

$W_{\delta}(s)$ - передаточная функция регулятора (используется ПИ-регулятор);

$W_i'(s) \cdot e^{-\tau_i s}$ - передаточная функция модели объекта;

$W_i'(s)$ - передаточная функция части модели объекта без запаздывания;

τ_i - величина запаздывания модели объекта;

$K_{PII\dot{E}}$ - коэффициент усиления ППИ - регулятора;

$T_{PII\dot{E}}$ - инерционная составляющая ППИ – регулятора.

По сравнению с предиктором Смита, ППИ – регулятор медленнее отрабатывает воздействие по заданию или возмущению. В то же время он является более устойчивым и легче в настройке, т. к. настройке подлежат только 3 параметра, а не 5 (как в предикторе Смита).

Кроме ППИ – регулятора, известно много других модификаций предиктора Смита; однако, они не получили широкого распространения.

Качество регулирования в САР с предиктором Смита и ППИ - регулятором существенно зависит от точности определения параметров модели объекта: чем ближе они к действительным значениям, тем лучшего качества регулирования можно добиться. Соответственно, возникает необходимость построения системы, которая способна самостоятельно, или при ограниченном участии обслуживающего персонала, приспособится к текущим условиям работы. Такими являются системы с контуром оптимизации или адаптивные. Целями создания адаптивных систем является обеспечение необходимых показателей качества регулирования объектов при изменении динамических параметров в широких пределах в процессе нормальной эксплуатации, а также для ускорения и обеспечения точности настройки систем регулирования при введении объекта в эксплуатацию.

4 МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ.

Целью данного раздела является анализ методов моделирования чистого запаздывания в САУ на примере моделирования с помощью не минимально-фазового звена первого порядка.

Известно, что большинство автоматизируемых объектов управления это процессы транспортировки материальных потоков и тепловые процессы. Чаще всего они могут быть описаны апериодическим звеном первого порядка с запаздыванием:

$$W_o(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k}{Ts + 1} e^{-\tau s}. \quad (4.1)$$

Где: k - коэффициент передачи;

T - постоянная времени;

τ - время чистого запаздывания.

4.1 Звено чистого запаздывания

1. Уравнение звена:

$$y(t) = x(t - \tau). \quad (4.2)$$

2. Передаточная функция звена:

$$W_z(s) = e^{-\tau s}. \quad (4.3)$$

3. Временные характеристики звена чистого запаздывания (рис. 4.1):

- 3.1. Переходная функция: $h(t) = 1(t - \tau).$ (4.4)

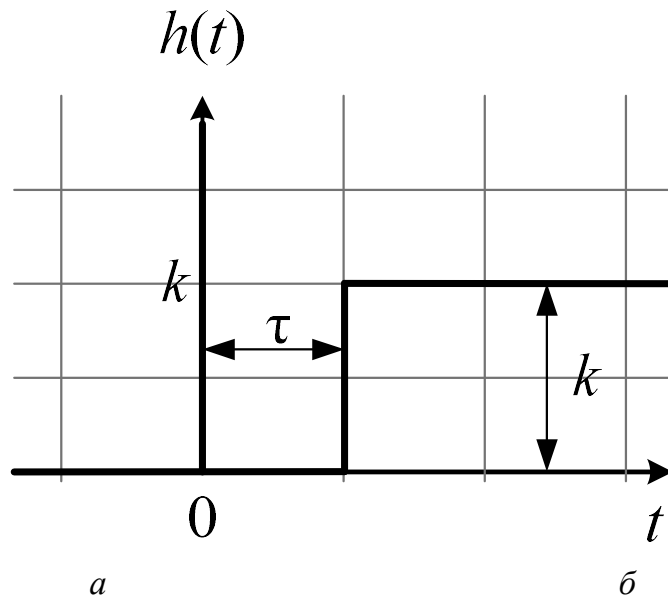


Рис. 4.1. Переходная характеристика звена чистого запаздывания

4. Частотные характеристики звена чистого запаздывания:

4.1. Амплитудно-фазовая частотная характеристика (рис. 4.2):

$$W(j\omega) = e^{-j\tau\omega} = (\cos \omega\tau - j \sin \omega\tau). \quad (4.5)$$

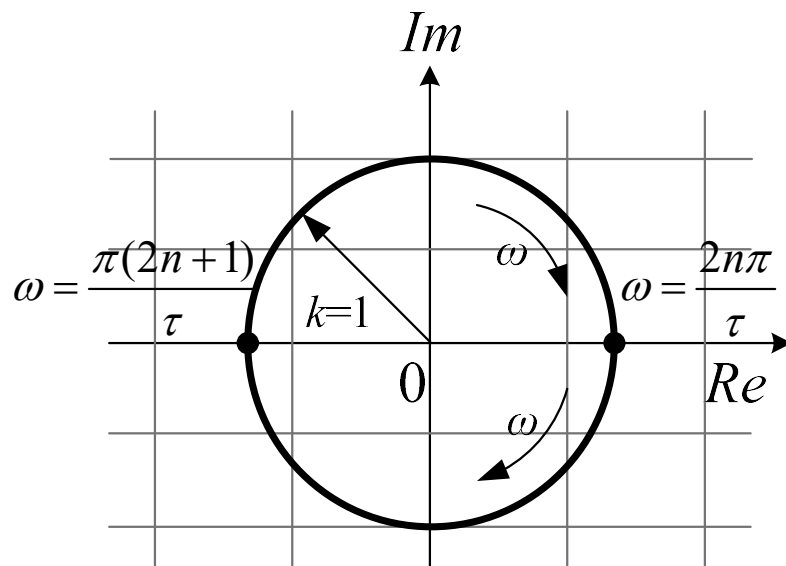


Рис. 4.2 Амплитудно-фазовая частотная характеристика звена чистого запаздывания

4.2. Амплитудно-частотная характеристика за 1 период (рис. 4.3, а):

$$A(\omega) = |W(j\omega)| = 1. \quad (4.6)$$

4.3. Фазочастотная характеристика (рис. 3.15, б):

$$\varphi(\omega) = -\omega\tau. \quad (4.7)$$

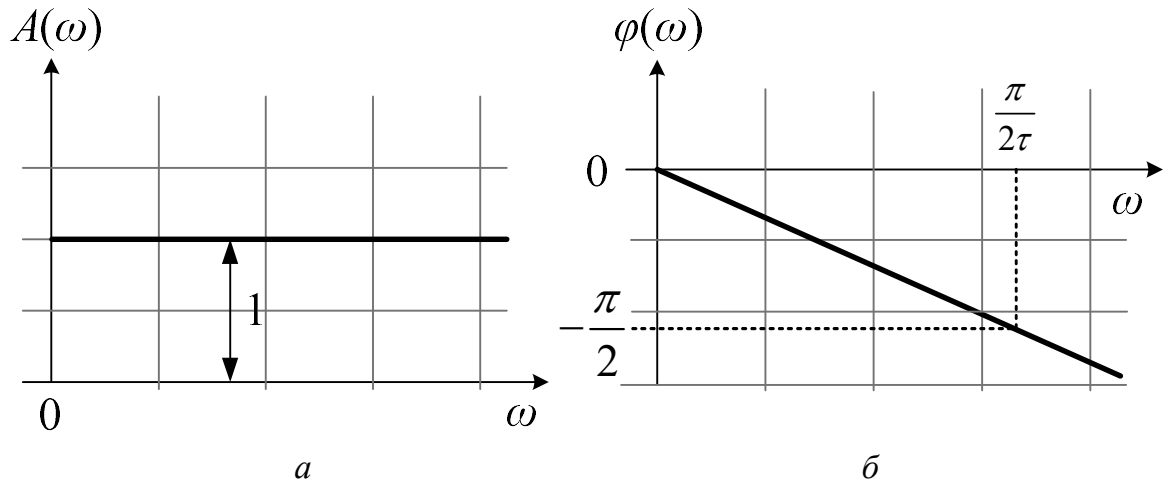


Рис. 4.3 Частотные характеристики звена чистого запаздывания:
а – амплитудная; б – фазовая

4.4. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика за 1 период (рис. 4.4, а):

$$L(\omega) = 0. \quad (4.8)$$

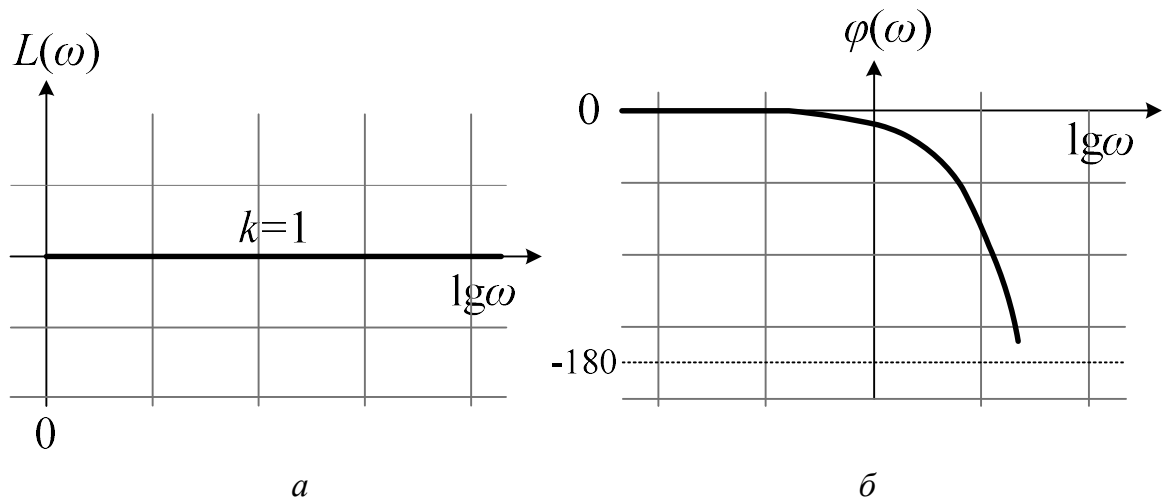


Рис. 4.4 Логарифмические характеристики звена чистого запаздывания:
а – амплитудная; б – фазовая

Аналитический синтез и исследования регуляторов для объектов с чистым запаздыванием приводит к трансцендентным уравнениям. Поэтому, наряду с точным его описанием, часто требуется аппроксимировать звено чистого запаздывания рациональными передаточными функциями.

Одно из приближений основано на использовании разложения экспоненты в ряд Тейлора:

$$e^{-x} = \frac{1}{1 + \frac{1}{1!} \cdot x + \frac{1}{2!} \cdot x^2 + \frac{1}{3!} \cdot x^3 + \dots}, \quad (4.9)$$

В этом случае в первом приближении чистое запаздывание можно представить апериодическим звеном первого порядка:

$$e^{-\tau s} \approx \frac{1}{\tau s + 1}, \quad (4.10)$$

Или более точно звеном второго порядка:

$$e^{-\tau s} \approx \frac{1}{0,5\tau^2 s^2 + \tau s + 1}, \quad (4.11)$$

Данный вид аппроксимации обладает низкой точностью, и приемлем при отношении $\frac{\tau}{T} \leq 0,1$.

Похожим приближением является аппроксимация звеном порядка N:

$$e^{-\tau s} \approx \frac{1}{\left(\frac{\tau}{N}s + 1\right)^N}, \quad (4.12)$$

В этом случае погрешность аппроксимации определяется порядком звена N.

Более точной считается аппроксимация с использованием ряда Паде. При этом экспонента заменяется дробной функцией с полиномами одинаковой степени в числителе и знаменателе. Обычно используются полиномы до четвертой степени включительно. Мы рассмотрим полиномы первой и второй степени. Эти звенья имеют положительные нули, и являются не минимально-фазовыми: При использовании полиномов первой степени звено имеет передаточную функцию:

$$e^{-\tau s} \approx \frac{-0,5\tau s + 1}{0,5\tau s + 1}, \quad (4.13)$$

При использовании полиномов второй степени звено имеет передаточную функцию:

$$e^{-\tau s} \approx \frac{\frac{\tau^2}{12}s^2 - 0,5\tau s + 1}{\frac{\tau^2}{12}s^2 + 0,5\tau s + 1}, \quad (4.14)$$

В программном пакете MatLAB смоделируем систему с заданными параметрами. Базовый объект управления – звено первого порядка, постоянная времени = 40 с. транспортное запаздывание = 60 с. и аппроксимации объекта с использованием не минимально–фазовых звеньев (4.13) и (4.14). Схема моделирования приведена на рис.4.5.

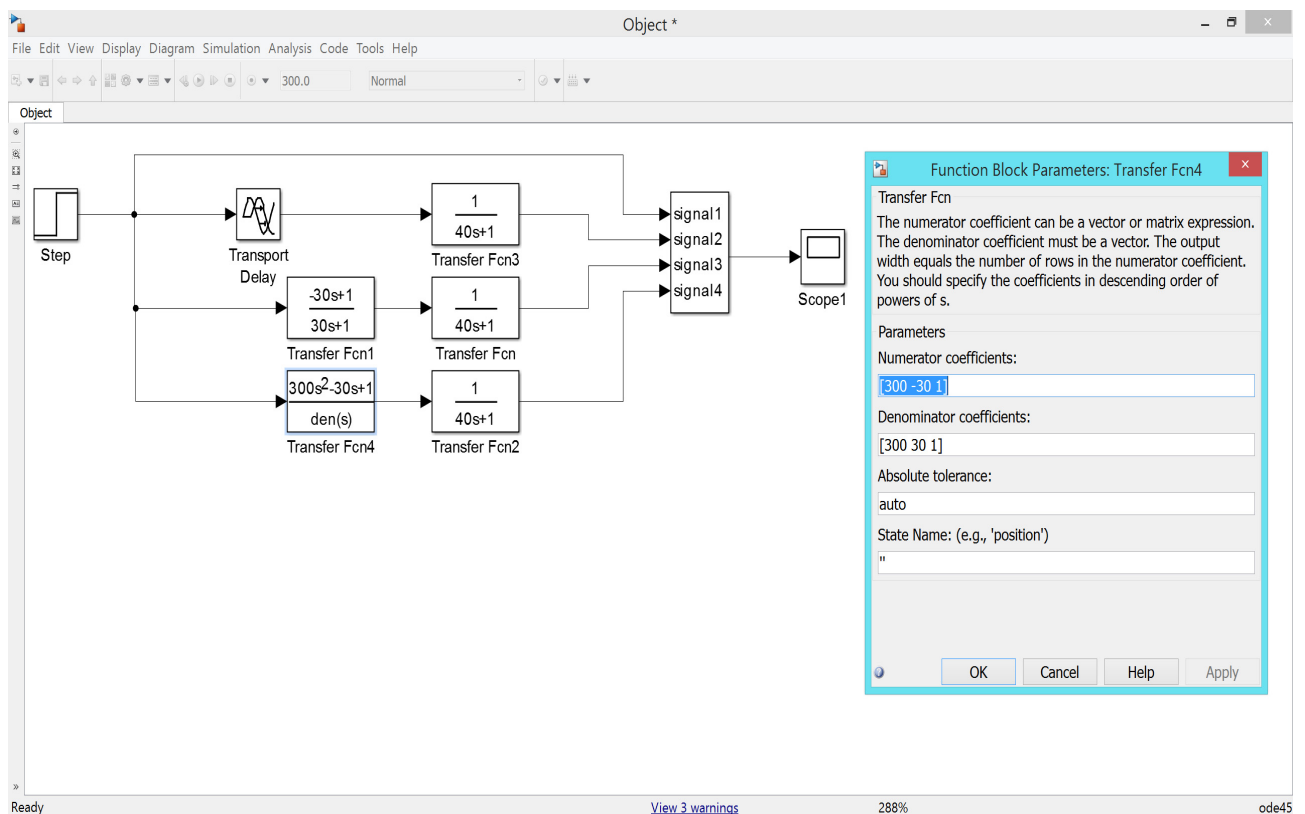


Рис.4.5 Структурная схема модели для исследования ТОУ с помощью аппроксимации запаздывания не минимально-фазовыми звеньями первого и второго порядка.

На рис. 4.6 приведены результаты моделирования базового ТОУ с характеристиками:

$$K = 1;$$

$$T = 40 \text{ с};$$

$$\tau = 60 \text{ с}.$$

Результаты показывают, что при аппроксимации объекта с использованием не минимально–фазового звена первого порядка максимальное отклонение переходного процесса от эталона составляет не более 25%.

При аппроксимации объекта с использованием не минимально–фазового звена второго порядка максимальное отклонение составляет не более 12%

Для исследования влияния на точность аппроксимации отношения τ/T были проведены расчетные эксперименты для $\tau = 20 \text{ с}$ и $\tau = 120$. Результаты приведены на рис.4.7 и рис.4.8, соответственно.

Результаты показывают, что при аппроксимации объекта, отношение τ/T которого равно 0,5, с использованием не минимально–фазового звена первого порядка максимальное отклонение переходного процесса от эталона составляет не более 8%. звена второго порядка - не более 5%.

При аппроксимации объекта отношение τ/T которого равно 3, с использованием не минимально–фазового звена первого порядка максимальное отклонение переходного процесса от эталона составляет 45%. звена второго порядка - более 25%.

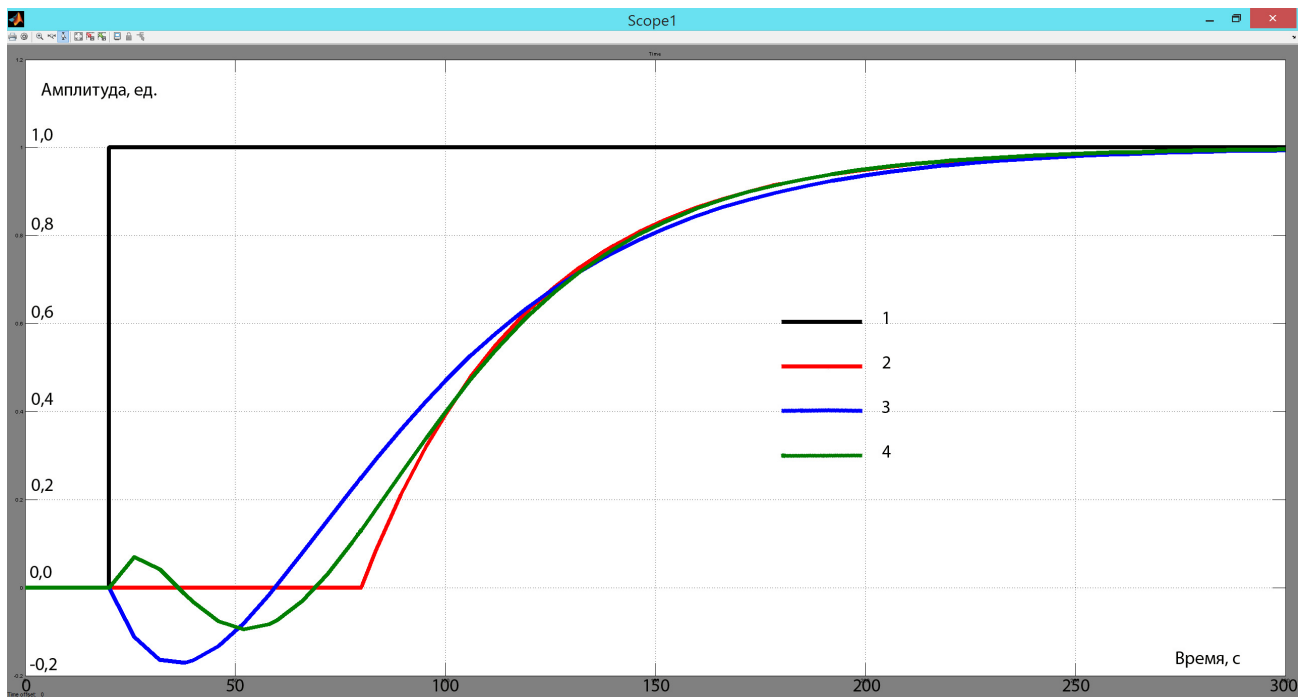


Рис.4.6 Результаты моделирования базового ТОУ с характеристиками:

$K = 1$; $T = 40$ с; $\tau = 60$ с ($\tau/T = 1,5$).

1- единичный скачек; 2-эталонное звено; 3 - аппроксимация не минимально фазовым звеном 1 поряка и 4 – второго порядка.

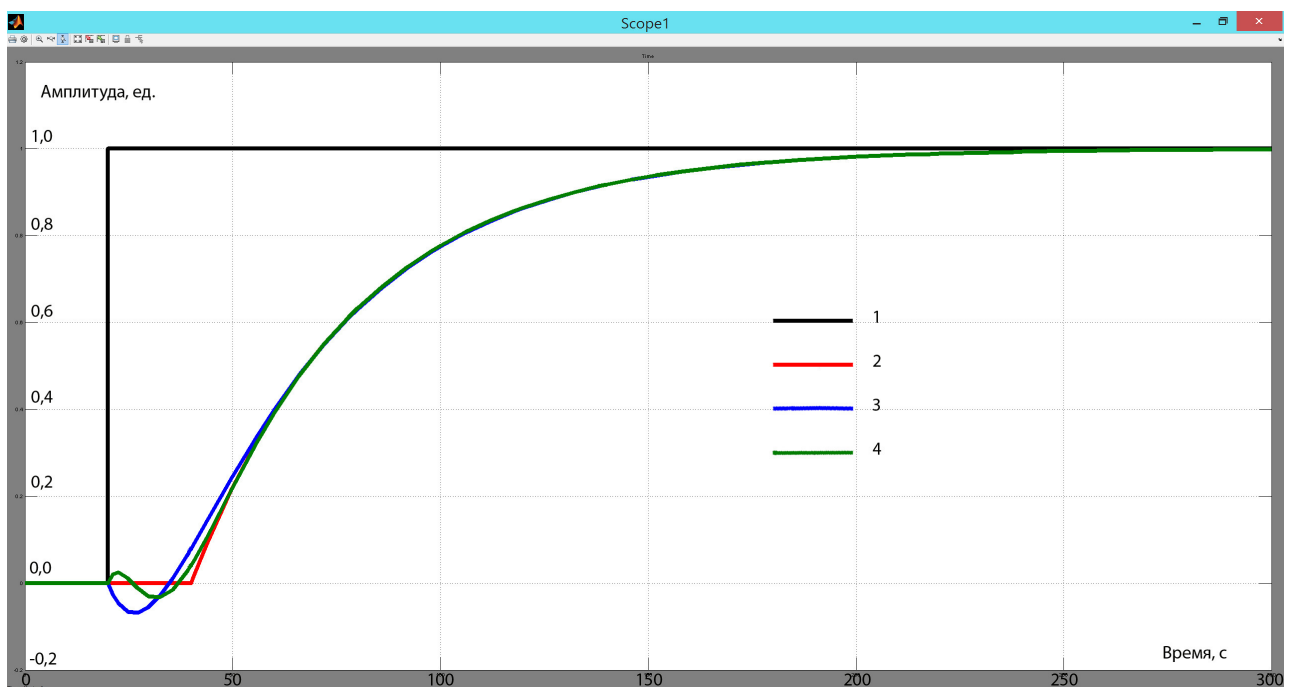


Рис.4.7 Результаты моделирования ТОУ с характеристиками:

$K = 1$; $T = 40$ с; $\tau = 20$ с ($\tau/T = 0,5$).

1- единичный скачек; 2-эталонное звено; 3 - аппроксимация не минимально фазовым звеном первого порядка и 4 – второго порядка

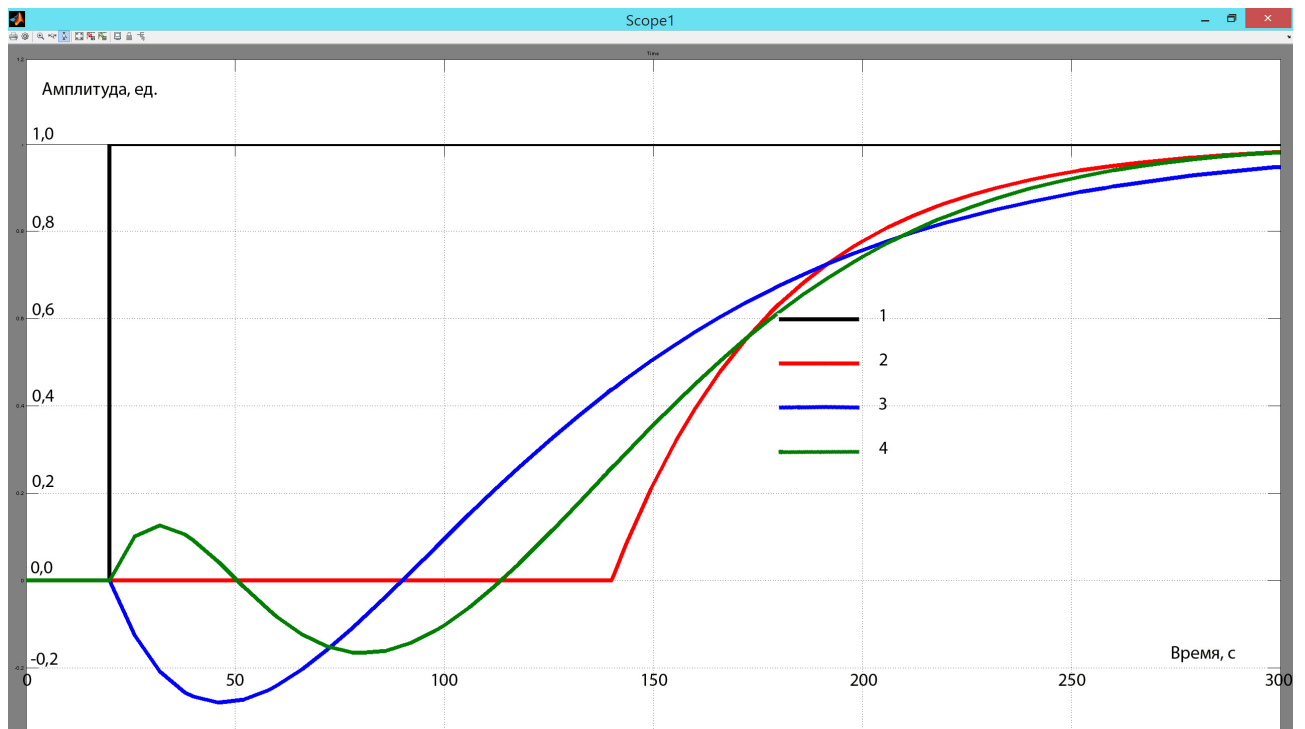


Рис.4.8 Результаты моделирования ТОУ с характеристиками:

$$K = 1; T = 40 \text{ с}; \tau = 120 \text{ с} (\tau/T = 3).$$

1- единичный скачек; 2-эталонное звено; 3 - аппроксимация не минимально фазовым звеном 1 порядка и 4 – второго порядка

В целом, результаты исследования ТОУ позволяют сделать вывод, что моделирование ТОУ при аппроксимации запаздывания с использованием не минимально-фазовых звеньев второго порядка может быть выполнено с приемлемой для решения задач анализа и синтеза точностью для соотношения τ/T не превышающего 1,5. При этом максимальное отклонение переходного процесса от эталона не будет превышать 12%.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ В СРЕДЕ Mathlab, Simulink.

Для заданного базового объекта управления описываемого звеном первого порядка с коэффициентом усиления = 1, постоянной времени = 40 с и транспортным запаздыванием = 60 с, используя библиотеки Simulink, собрали модель. Модель приведена на рис. 5. Она включает три системы автоматического управления. Первая с предиктором Смита, и две с ПИД регуляторами настраиваемыми по разным методикам. Одна с помощью метода оптимального модуля, другая методом Зиглера и Никольса. Каждая система включает объект, состоящий из апериодического звена и звена чистого запаздывания, ПИД регулятор и обратные связи. Система с предиктором Смита содержит локальную обратную связь с компенсатором запаздывания. Предусмотрена одновременная подача скачка по управлению и синхронная регистрация переходных процессов.

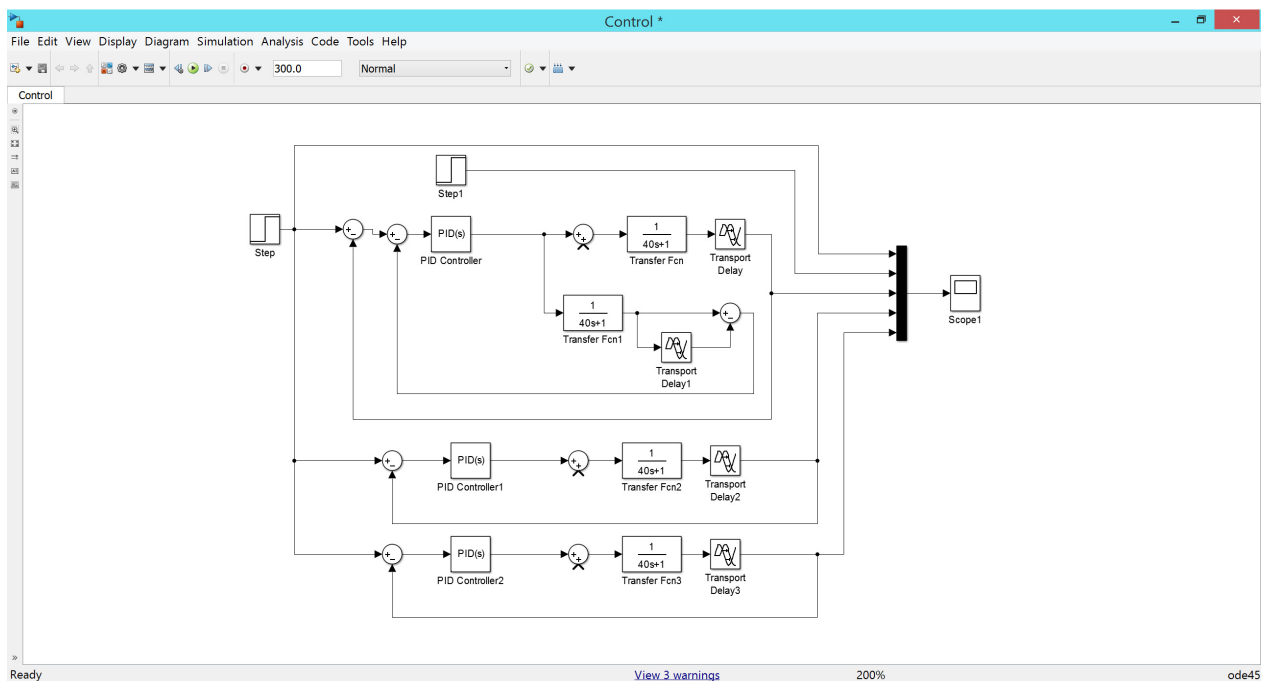


Рис.5. Модель для исследования алгоритмов управления базовым ТОУ.

На рис.5.1, рис.5.2, рис.5.3 приведены настройки ПИД регуляторов систем с регуляторами Смита, ПИД-ОМ, и ПИД З – Н.

Настройка ПИД регулятора для предиктора Смита проведена вручную. Компенсация запаздывания позволила установить относительно большое значение K_R и добиться малого времени регулирования при апериодическом переходном процессе.

Параметры ПИД регуляторов для одноконтурных систем для достижения лучших показателей качества также пришлось подстраивать. Причем параметры полученные методом З – Н - существенно.

Результаты моделирования для базового ТОУ приведены на Рис.5.4.

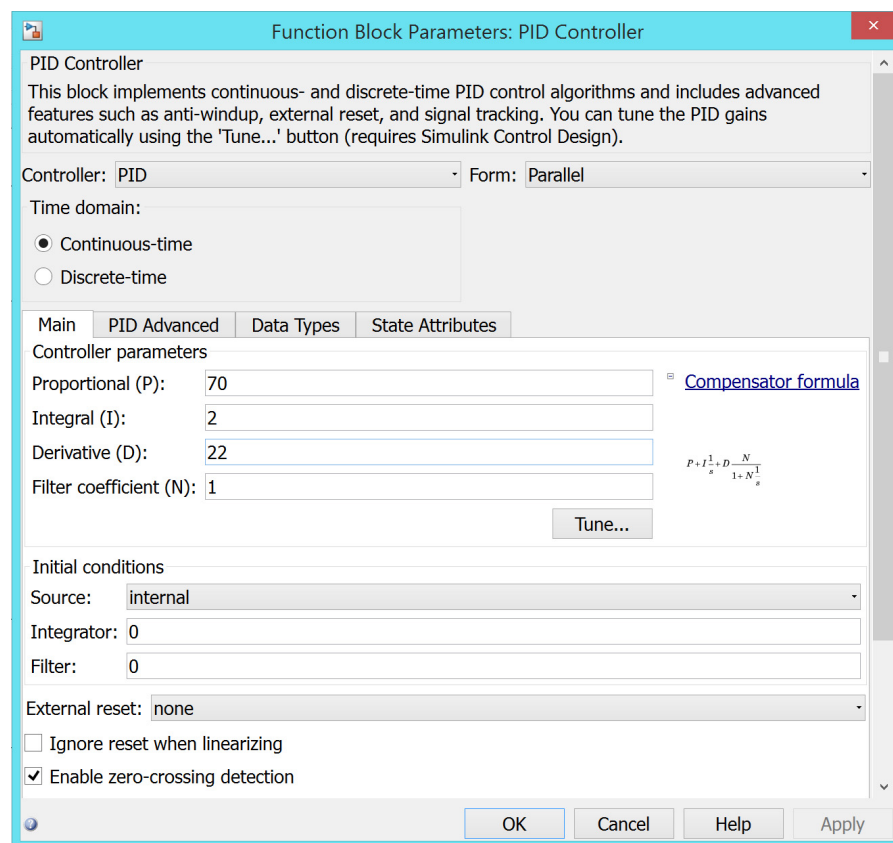


Рис.5.1. Настройки ПИД регулятора системы с предиктором Смита.

Function Block Parameters: PID Controller1

PID Controller
This block implements continuous- and discrete-time PID control algorithms and includes advanced features such as anti-windup, external reset, and signal tracking. You can tune the PID gains automatically using the 'Tune...' button (requires Simulink Control Design).

Controller: **PID** Form: **Parallel**

Time domain:
☒ Continuous-time
☐ Discrete-time

Main PID Advanced Data Types State Attributes

Controller parameters

Proportional (P): [Compensator formula](#)

Integral (I):

Derivative (D):

Filter coefficient (N):

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

[Tune...](#)

Initial conditions

Source: **internal**

Integrator:

Filter:

External reset: **none**

☐ Ignore reset when linearizing
☒ Enable zero-crossing detection

[OK](#) [Cancel](#) [Help](#) [Apply](#)

Рис.5.2. Настройки ПИД регулятора системы с помощью метода оптимального модуля.

Function Block Parameters: PID Controller2

PID Controller
This block implements continuous- and discrete-time PID control algorithms and includes advanced features such as anti-windup, external reset, and signal tracking. You can tune the PID gains automatically using the 'Tune...' button (requires Simulink Control Design).

Controller: **PID** Form: **Parallel**

Time domain:
☒ Continuous-time
☐ Discrete-time

Main PID Advanced Data Types State Attributes

Controller parameters

Proportional (P): [Compensator formula](#)

Integral (I):

Derivative (D):

Filter coefficient (N):

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

[Tune...](#)

Initial conditions

Source: **internal**

Integrator:

Filter:

External reset: **none**

☐ Ignore reset when linearizing
☒ Enable zero-crossing detection

[OK](#) [Cancel](#) [Help](#) [Apply](#)

Рис.5.3. Настройки ПИД регулятора системы с помощью метода Зиглера - Никольса.

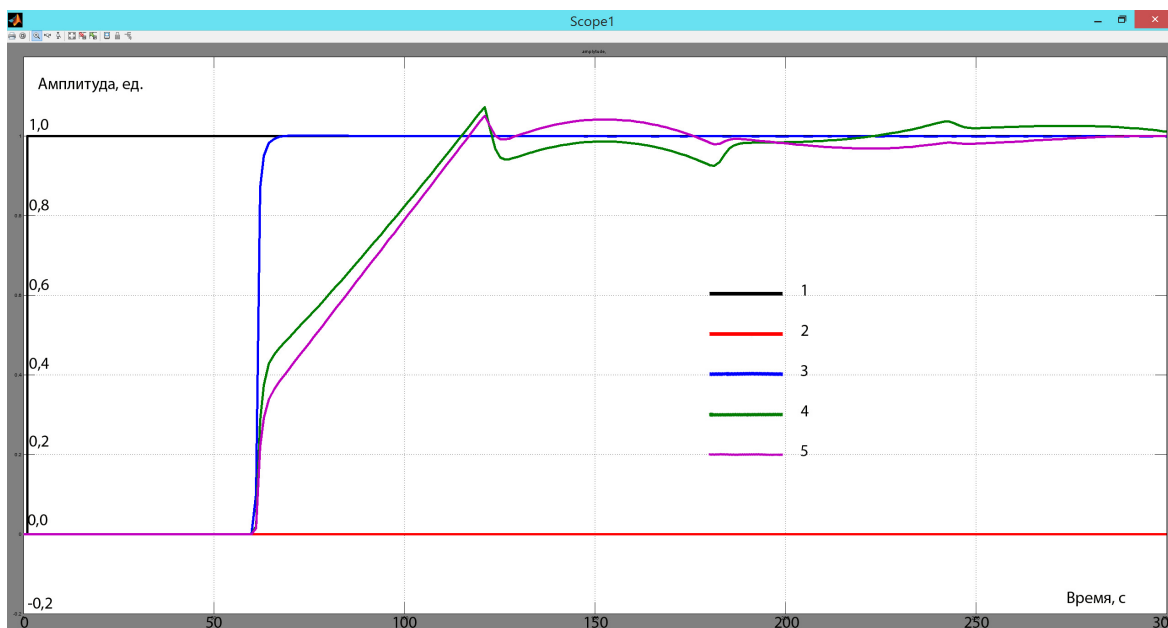


Рис.5.4. Результаты моделирования для базового ТОУ.

1 – сигнал управления, 2 – сигнал возмущения, 3 – выход САР с предиктором Смита, 4 - выход САР с ПИД ОМ, 5 - выход САР с ПИД З-Н.

Результаты моделирования показывают, что САР с предиктором Смита для базовых параметров объекта обладает существенно лучшими показателями качества управления. А именно: время регулирования в 2 раза лучше чем у одноконтурных САР с ПИД регуляторами и отсутствие перерегулирования.

Для оценки грубости систем были проведены расчетные эксперименты с изменением параметров ТОУ на + 20%, -20%, +5% и -5%. Результаты приведены на рис.5.5, рис.5.6, рис.5.7, рис.5.8.

Оценка качества управления проводилась по прямым показателям качества:

T_p – время регулирования;

$$\rho = \frac{y - y_{уст}}{y_{уст}} \cdot 100\%, \text{ - перерегулирование;}$$

и среднему квадратическому отклонению в установившемся режиме

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y - y_{зад})^2}{n}} \cdot \frac{100\%}{y_{зад}}.$$



Рис.5.5. Расчетные эксперименты с изменением параметров ТОУ на + 20%

1 – сигнал управления, 2 – сигнал возмущения, 3 – выход САР с предиктором Смита,
4 - выход САР с ПИД ОМ, 5 - выход САР с ПИД 3-Н.



Рис.5.6. Расчетные эксперименты с изменением параметров ТОУ на - 20%

1 – сигнал управления, 2 – сигнал возмущения, 3 – выход САР с предиктором Смита,
4 - выход САР с ПИД ОМ, 5 - выход САР с ПИД 3-Н.

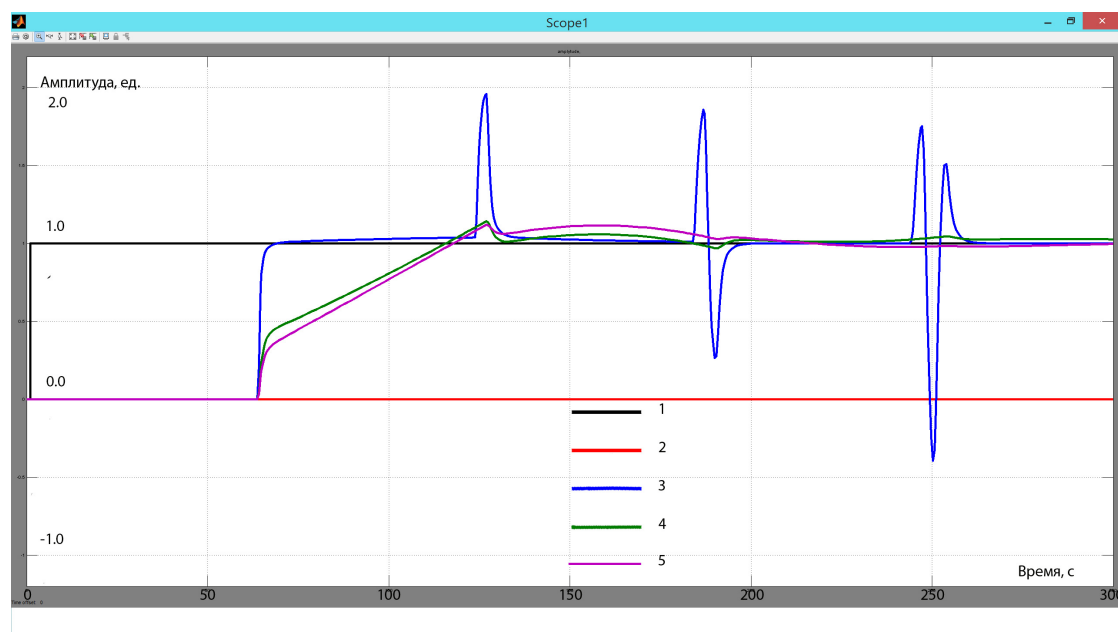


Рис.5.7. Расчетные эксперименты с изменением параметров ТОУ на + 5%

1 – сигнал управления, 2 – сигнал возмущения, 3 – выход САР с предиктором Смита,
4 - выход САР с ПИД ОМ, 5 - выход САР с ПИД 3-Н.

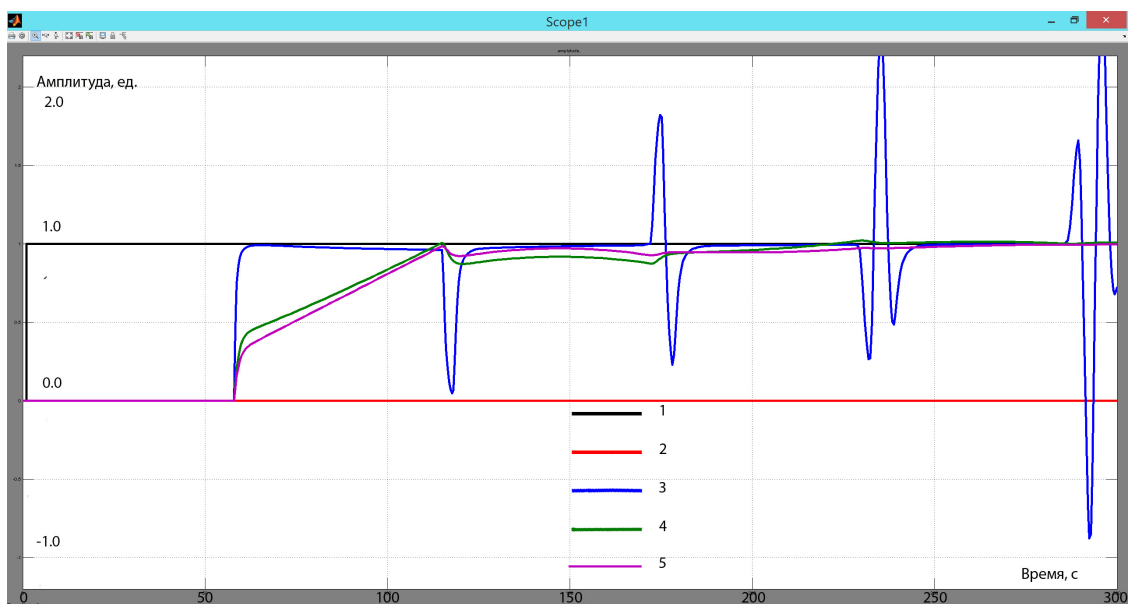


Рис.5.8. Расчетные эксперименты с изменением параметров ТОУ на -5%

1 – сигнал управления, 2 – сигнал возмущения, 3 – выход САР с предиктором Смита,
4 - выход САР с ПИД ОМ, 5 - выход САР с ПИД 3-Н.

Результаты экспериментов приведенные в Таблице 5.1 показывают, что САР с предиктором Смита показывает отличное качество управления при точного соответствия параметрам ТОО. В этом случае ее показатели качества значительно превышают показатели систем с ПИД регуляторами. Но при изменении параметров объекта менее чем на 5% САР с предиктором теряет устойчивость и переходит в колебательный режим. В то же время САР с ПИД регуляторами сохраняют устойчивость и приемлемое качество управления при изменении параметров ТОО более чем на 20%.

Таблица 5.1. Сравнение показателей качества управления

Параметры объекта	Показатели качества (Время регулирования - T_r ; перерегулирование - ρ ; среднее квадратическое отклонение - σ)		
	Смита $K_R = 72$; $T_i = 35$ с; $T_d = 0,31$ с	ПИД ОМ $K_R = 0,78$; $T_i = 61$ с; $T_d = 14$ с	ПИД 3-Н $K_R = 0,8$; $T_i = 120$ с; $T_d = 30$ с
$K = 1$; $T = 40$ с; $\tau = 60$ с	$T_r = 65$ с; $\rho = 0$; $\sigma = 0$.	$T_r = 180$ с; $\rho = 9\%$; $\sigma = 1\%$.	$T_r = 130$ с; $\rho = 5\%$; $\sigma = 1\%$.
$K = 1,2$; $T = 48$ с; $\tau = 72$ с (+ 20%)	Режим расходящихся колебаний	$T_r = 220$ с; $\rho = 15\%$; $\sigma = 0,5\%$.	$T_r = 250$ с; $\rho = 15\%$; $\sigma = 1\%$.
$K = 0,8$; $T = 32$ с; $\tau = 48$ с. (-20%)	Режим расходящихся колебаний	$T_r = 180$ с; $\rho = 0\%$; $\sigma = 0\%$.	$T_r = 190$; $\rho = 0\%$; $\sigma = 0\%$.
$K = 1,05$; $T = 42$ с; $\tau = 63$ с. (+5%)	Режим расходящихся колебаний	$T_r = 130$ с; $\rho = 5\%$; $\sigma = 1\%$.	$T_r = 180$ с; $\rho = 5\%$; $\sigma = 1\%$.
$K = 0,95$; $T = 38$ с; $\tau = 57$ с. (-5%)	Режим расходящихся колебаний	$T_r = 125$ с; $\rho = 0\%$; $\sigma = 2\%$.	$T_r = 115$ с; $\rho = 0\%$; $\sigma = 1,5\%$.

Из этого можно сделать вывод, что САР с предиктором Смита целесообразно использовать для объектов, параметры которых известны с высокой точностью и остаются неизменными в процессе работы. Или совместно с хорошо работающими системами самонастройки параметров регулятора.

